DOI: 10.5846/stxb201606301336
黄和平,王丽影.基于能源代谢分析的南昌市能源消费碳排放综合生态效率研究.生态学报,2017,37(12):4191-4197.
Huang H P, Wang L Y.EMA-based analysis on the eco-efficiency of carbon emission of energy consumption: A case study of Nanchang.Acta Ecologica Sinica,2017,37(12):4191-4197.

基于能源代谢分析的南昌市能源消费碳排放综合生态效率研究

黄和平[1,*],王丽影[2]
1 江西财经大学鄱阳湖生态经济研究院, 南昌　330013
2 江西财经大学旅游与城市管理学院, 南昌　330032

摘要:有关能源消费的代谢机理及生态效率研究是当前生态经济研究领域中的重点和难点,也是政府决策部门、相关行业及人群关注的热点。基于能源代谢分析理念,构建了基于相对变量的城市能源消费碳排放综合生态效率度量模型,对 2000—2013 年南昌市能源消费结构、碳排放量及其生态效率进行了测算与分析。结果表明:(1) 南昌市在 2000—2013 年,能源消费量和碳排放量整体上呈"*N*"型曲线上升的一致性变化特征,主要经历了快速增长、短暂下降、恢复平稳增长 3 个阶段,且煤炭是南昌市能源消费和碳排放的主要来源,短时期内难以改变;(2) 南昌市的能源消费效率和碳排放效率整体上在不断优化;(3) 南昌市能源消费碳排放综合生态效率经历了较大的波动变化,整体上的生态效率分值并不高;仍需要加大节能减排力度,全面优化南昌市能源消费结构。

关键词:能源代谢分析;碳排放;能源消费;综合生态效率;南昌市

EMA-based analysis on the eco-efficiency of carbon emission of energy consumption: A case study of Nanchang

HUANG Heping[1,*], WANG Liying[2]
1 *Institute of Poyang Lake Eco-Economics, Jiangxi University of Finance & Economics, Nanchang* 330013, *China*
2 *School of Tourism and Urban Management, Jiangxi University of Finance & Economics, Nanchang* 330032, *China*

Abstract: Eco-efficiency of carbon emissions derived from energy consumption is a key issue in the field of ecological economic research, as well as a hot topic that has attracted government decision-making departments and has caught the attention of industry professionals and the public. Based on the concept of energy metabolic analysis (EMA), the ecological efficiency measurement model of carbon emissions from city energy consumption was established, and the energy consumption and carbon emissions of Nanchang from 2000 to 2013 were calculated and analyzed. The eco-efficiency of carbon emissions from energy consumption in Nanchang was also analyzed. The results showed that: (1) In 2000—2013, the energy consumption and carbon emissions of Nanchang had been increasing as an N-shape curve on the whole, mainly exhibiting three stages, including rapid growth, short-term decline, and steady growth. Coal was the main source of the city′s energy consumption and carbon emissions, which would be difficult to change in the short term; (2) The energy consumption efficiency and carbon emission efficiency of Nanchang were improving on the whole; (3) The comprehensive ecological efficiency of energy consumption in Nanchang did not greatly improve, suggesting the ongoing need to increase the

基金项目:国家自然科学基金项目(41661113);教育部人文社科规划基金项目(14YJA790013);江西省教育厅科技项目(GJJ14339);江西省经济社会发展智库项目(16ZK15);江西省学位与研究生教育教学改革研究项目(JXYJG-2016-064)
收稿日期:2016-06-03;　　**修订日期**:2017-01-16

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hphuang2004@163.com

intensity of energy-saving emission reduction efforts, and to optimize the energy consumption structure.

Key Words: Energy metabolism analysis (EMA); carbon emissions; energy consumption; Comprehensive ecological efficiency (CEE); Nanchang

近年来,中国经济的高速增长带来能源消耗的急剧增加,随之带来的碳排放也快速增长。2007 年,我国能源消费碳排放量首次超过美国,成为全球最大的碳排放国[1-2]。能源消耗和 CO_2排放量不断增加,带来了严重的生态破坏、资源短缺和环境污染等一系列严重问题,这些问题又反过来抑制中国经济的可持续发展。2009 年哥本哈根气候大会上,我国政府提出 2020 年单位国内生产总值 CO_2排放比 2005 年下降 40%—45%的减排目标[3-4]。而在能源消费结构中,城市是能源消费及碳排放的主体。据估计城市碳排放占全球碳排放总量的 78%[5],在致力于低碳经济发展道路中,城市能源消费碳排放生态效率的研究占举足轻重的地位。

能源代谢分析(Energy metabolism analysis,EMA)作为物质代谢分析或物质流分析(MFA)的深化或一部分,其分析方法类似于物质代谢分析[6-7]。Niza 等提出物质流分析是阐释国家、区域和城市代谢的有力工具,基于投入和产出将建筑、交通、消费和废物处理等过程与活动系统联系起来有助于理解城市代谢过程[8];David Browne 等通过能源流账户、能源代谢比率分析及能源足迹等分析工具对爱尔兰城市-区域尺度的可持续发展进行了估算[9];Tatjana Kuznecova 等基于能源代谢分析的角度,提出了城市环境恢复力的度量方法[10]。在核算方法上,王越等运用工业代谢分析方法对某农药化学工业园能源代谢系统进行量化分析并得出结论:提升能源转化水平、改善能源利用效率是优化该工业园能源系统的 2 个有效途径,可减少能源代谢过程中的资源消耗与环境压力[11];刘晔等从能源代谢角度用社会代谢的多尺度整合分析方法(MSIAMS)研究了中国区域社会和生态系统的能源代谢特征[12];针对碳排放研究在城市尺度核算的薄弱环节,以及城市代谢研究在社会经济子系统碳基能源转移分析上的缺陷,张丽君等基于碳足迹与城市代谢阐释城市碳基能源代谢的内涵,界定其核算范畴与边界,构建了城市复合生态系统碳基能源 4 种范畴不同代谢过程的核算方法体系,并以北京市为案例,阐明了基于地理边界、足迹区及地理边界+等 3 种核算方法的特点[13];戴刚等通过社会代谢多尺度综合评估(MSIASM)方法,采用生物-经济压力和不同组织尺度下的体外能代谢率、能源密度指标,并将能源消费碳排放融入评估框架,评价了中国四大直辖市 2004 年至 2010 年的社会代谢及其综合发展状况,其中能源消费碳排放的加入较好补充了 MSIASM 在生态评估方面的弱势[14]。由上可知,能源代谢及效率分析是一种多层级、多尺度系统分析能源区域消费与利用格局的综合分析理念,对能源消费生态效率的研究意义重大。

借鉴世界可持续发展工商业联合会给定的生态效率的概念,即:通过提供具有价格优势的服务和商品,在满足人类高质量生活需求的同时,将整个生命周期中对环境的影响降到至少与地球的估计承载力一致的水平上,简单说来,就是影响最小化,效益最大化[15]。将其移植于能源消费领域,就是通过提供具有价格优势的能源消费服务和商品,在满足人类对高质量能源需求的同时,将能源消费整个生命周期中对环境的影响降到最低。鉴于能源消费系统的输入端和输出端分别为能源消耗和碳排放,代表两端的资源效率和环境效率分别为能源消耗效率和碳排放效率,为避免混淆,两者综合起来则为能源消费的碳排放生态效率或能源消费碳排放综合生态效率。

由此可见,能源代谢分析能清楚地解构能源消耗类型、结构及排放通量,它是生态效率研究的基础工作,其分析过程则为生态效率的度量提供了基本参数。

南昌市是中部唯一的低碳试点省会城市,但近年南昌经济高速发展在改善人们生活的同时,也带来了能源消耗和碳排放的快速增加。粗放型经济增长模式带来了一系列的问题:消费结构不合理、能耗增加带来污染物同比增加、产业结构不合理等,严重阻碍低碳经济的转变[16]。基于此,本文在能源代谢分析理念的基础上,对输入端——南昌市能源消费和输出端——能源消费产生的碳排放分别计算,最后把两者结合对综合生态效率进行实证研究分析,以此归纳南昌市能源消费碳排放综合生态效率变化规律,为实现城市低碳经济发

展提供理论参考和决策依据,这对提高鄱阳湖生态经济区社会经济发展可持续性也具有重要的理论指导和实践应用价值。

1　研究方法与数据来源

1.1　碳排放公式

依据 2006 年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供的碳排放计算公式,将南昌市能源消费碳排放量计算公式确定为:

$$C_t = \sum_{i=1}^{n} S_i \times P_i \tag{1}$$

式中,C_i为能源消费碳排放总量($\times 10^4$ t),i 表示能源的种类,S_i为第 i 种能源的消费量($\times 10^4$ t),折算成标准煤计算,P_i为第 i 种能源碳排放系数。根据南昌市能源消费现状,选取原煤、焦炭、天然气等 9 种主要的能源消耗种类进行计算分析[17]。主要能源消费碳排放系数来源于 IPCC 碳排放计算指南缺省值(表 1)。

表 1　各种能源折标准煤系数和碳排放系数

Table 1　Standard coal coefficient and carbon emission coefficient of various energy sources

能源品种 Energy variety	原煤 Virgin coal	洗精煤 Washed coal	焦炭 Hard coke	汽油 Gasoline	煤油 Kerosene	柴油 Diesel oil	燃料油 Fuel oil	天然气 Natural gas	电力 Electric power
折标准煤系数 Standard coal coefficient	0.7143	0.9	0.9714	1.4714	1.4571	1.4571	1.4286	0.1229	0.1229
碳排放系数/(t/t) Carbon emission coefficient	0.7559	0.7559	0.855	0.5538	0.5714	0.5912	0.6185	0.4483	0.6800

1.2　城市能源消费碳排放综合生态效率度量模型的构建

能源消费碳排放效率是生态效率的一种形式,即是关于能源消费和碳排放的生态效率。为避免与能源消费效率和 CO_2排放效率混淆,这里将两者整合的能源消费碳排放生态效率称为能源消费碳排放综合生态效率。借鉴世界可持续发展工商业联合会(WBCSD)定义的生态效率的概念,其公式可表达为:

$$\text{能源消费碳排放生态效率} = \frac{\text{能源消费领域增加值}}{\text{能源消耗或环境负荷}} \tag{2}$$

从公式(2)中可以看出,分子所代表的是因能源消费所带来的福利或服务,这里用能源消费领域增加值来指示,考虑到难以将能源消费领域的增加值从社会总产值或地区生产总值中分离出来,故这里还是用地区生产总值代替;分母所指的是能源消耗或环境负荷,环境负荷即能源消耗所产生的 CO_2排放。相应地,按照单要素指标法,能源消费碳排放生态效率可以分为能源消费效率和 CO_2排放效率。如果能源消费碳排放生态效率是能源消费领域增加值与环境负荷增长速率的比值,即相当于弹性系数的倒数,则是一个无量纲表达式,这里分别用 x 和 y 表示:

$$x = \frac{\delta(\text{GDP})}{\theta(\text{能源消耗量增长倍数})} \tag{3}$$

$$y = \frac{\delta'(\text{GDP})}{\theta'(\text{能源消耗产生的 } CO_2 \text{ 排放量增长倍数})} \tag{4}$$

式中,x 即能源消费效率,y 即 CO_2排放效率,x 和 y 分别从源头输入端(减少原生能源的消耗)和末端输出端(减少 CO_2排放这一污染物的产生)的角度用模型结合来表征南昌市的能源消费碳排放综合生态效率。

本文在量化能源消费效率和 CO_2排放效率基础上,参照上述研究成果,提出基于相对变量的集能源消费效率和 CO_2排放效率合成的能源消费碳排放综合生态效率,其表达公式为:

$$E = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{5}$$

式中,E 代表综合生态效率,x 代表能源消费效率,y 代表 CO_2 排放效率,经过标准化处理后的能源消费效率和 CO_2 排放效率的值位于[0, 1]之间,生态效率值 E 则位于[0, $\sqrt{2}$]之间[18]。

1.3 各数据的相对化和标准化处理

按照上述对能源消费效率和 CO_2 排放效率的公式定义,可知公式是一个无量纲的表达式,需要对上述公式(3)和公式(4)做相应的相对化处理,根据本文的情况,公式(3)和公式(4)可分别具体表达为公式(6)和公式(7):

$$x=\frac{\text{第 } n+1 \text{ 年的 GDP/第 } n \text{ 年的 GDP}}{\text{第 } n+1 \text{ 年的能源消费量/第 } n \text{ 年的能源消费量}} \tag{6}$$

$$y=\frac{\text{第 } n+1 \text{ 年的 GDP/第 } n \text{ 年的 GDP}}{\text{第 } n+1 \text{ 年的能源消耗产生的 } CO_2 \text{ 排放量/第 } n \text{ 年的能源消耗产生的 } CO_2 \text{ 排放量}} \tag{7}$$

根据上述生态效率度量模型的要求,能源消费效率和 CO_2 排放效率的值位于[0,1]之间,因此需要对能源消费效率和 CO_2 排放效率进行标准化处理,消除变量间的量纲关系,使数据具有可比性。本文选用 MIN-MAX 标准化方法。由于上述处理的指标均为正向型指标,其标准化方法见公式(8):

$$R=\frac{x_i-\min(x_i)}{\max(x_i)-\min(x_i)} \tag{8}$$

式中,R 表示标准化后的值,x_i 表示指标原始数据值。

在标准化处理后,再分别平均得到南昌市历年能源消费效率和 CO_2 排放效率的标准化值,然后按照公式 $E=\sqrt{x^2+y^2}$ 推算出南昌市能源消费碳排放综合生态效率[19]。

1.4 数据来源

本研究中能源消费及碳排放量计算中采用的原始数据均来自于 2001—2014 年《南昌市统计年鉴》,各种能源折标准煤参考系数和碳排放折算系数来源于《中国能源统计年鉴》,并利用统计软件对南昌市能源消费效率和 CO_2 排放效率进行相对化和标准化处理以消除量纲影响。

2 实证分析

2.1 南昌市能源消费及碳排放分析

根据上述研究方法中提出的能源消费碳排放量计算公式以及折标准煤系数,计算得出南昌市能各能源的 CO_2 排放量和能源消费总量,如表 2(其中总量已按标准煤系数进行换算)所示。

表 2 南昌市 2000—2013 年各能源碳排放量和能源消耗总量/×10^4 t

Table 2 Total energy carbon emissions and energy consumption in Nanchang from 2000 to 2013

年份 Year	原煤 Virgin coal	洗精煤 Washed coal	焦炭 Hard coke	汽油 Gasoline	煤油 Kerosene	柴油 Diesel oil	燃料油 Fuel oil	天然气 Natural gas	电力 Electric power	碳排放总量 Total carbon emission	能源消费总量 Total energy consumption
2000	161.48	33.49	30.51	0.28	0.08	0.68	1.75	0.00	12.89	241.16	236.12
2001	227.07	35.08	32.73	0.25	0.07	0.56	1.35	0.00	13.85	310.96	301.38
2002	210.17	50.68	52.88	0.21	0.05	0.63	1.23	0.00	14.68	330.53	326.75
2003	251.34	48.91	55.36	0.28	0.04	0.98	1.25	0.00	16.96	375.13	367.88
2004	284.23	50.14	67.05	0.29	0.06	1.05	1.32	0.00	21.41	425.56	414.92
2005	270.95	53.96	73.15	0.28	0.08	1.42	1.55	0.01	25.89	427.30	416.12
2006	314.63	82.95	98.36	0.39	0.11	1.99	1.59	0.02	28.80	528.83	522.91
2007	314.73	90.33	107.26	0.37	0.04	2.03	1.03	0.03	32.89	548.70	541.23
2008	164.93	86.92	96.23	0.60	0.06	2.08	0.70	0.03	51.50	403.04	386.44
2009	84.06	92.77	102.17	0.65	0.08	2.01	0.67	0.02	50.14	332.56	323.45
2010	280.63	88.22	100.33	0.73	0.07	2.54	0.78	0.06	59.64	533.01	505.19
2011	326.30	84.32	94.74	0.62	0.07	2.05	1.06	0.34	62.76	572.27	537.13
2012	277.51	87.89	119.82	0.62	0.04	2.01	1.11	0.19	70.36	559.55	525.06
2013	287.78	91.19	122.22	0.71	0.03	1.70	0.83	0.24	76.45	581.14	541.31

从表 2 可以看出,南昌市 CO_2 排放量与能源消费量保持相同增长趋势,能源消耗的快速增长带动 CO_2 排放量同比增长,具体分为 3 个阶段:第一阶段,2000—2007 年,能源消耗和 CO_2 排放量平均年增速分别为 12.6%、12.5%,增速明显,该阶段主要源于南昌市近年来积极从老工业城市向发展二三产业转型,二三产业的快速发展,使得能源消耗和 CO_2 排放量也急剧上升;第二阶段,2008—2009 年,能源消耗和碳排放呈下降趋势,究其原因,主要是上一阶段,能源消耗和碳排放过快增长,人们逐渐意识到能源的过度消耗和环境污染破坏,积极着手申请转型,向低碳经济城市发展,2009 年,南昌被列为中部唯一低碳试点省会城市。此阶段有所缓解;第三阶段,2010—2013 年,能源消耗和碳排放都恢复到平稳增长的阶段。具体来看,除了柴油和燃料油的碳排放呈下降的趋势,其余能源消耗的碳排放量都呈增长走向。石油的碳排放量少,主要归因于南昌当地的矿产资源主要是煤炭,石油资源匮乏;天然气的碳排放量是所有能源消耗的碳排放量中最少的一个,一方面因为天然气是清洁能源,碳排放量少,另一方面,由于经济和一些外部条件,2005 年天然气才投入使用,且上文分析中得知,CO_2 排放量与能源消耗量呈同比增长趋势,可知天然气这种低碳能源所占目前总能源消费的比重非常低,电力虽呈现递增趋势,但相比较于煤炭,其所占能源消耗的比重也非常低;而煤炭的碳排放量整体上仍在不断增长,且煤炭的碳排放量是所有能源消耗中碳排放量最多的能源,占总能源碳排放量平均值的 85%以上,这说明虽然南昌在积极地向低碳循环经济发展模式转型,但其长期以来以煤炭为主的能源消费结构在短时期还难以动摇。在今后的能源消费使用中,天然气和电力等低碳能源还需大力挖掘开发推广,能源消费结构的调整和优化任重而道远。

2.2 南昌市能源消费碳排放综合生态效率的测算分析

以上述模型中公式(2)为计算基础,再根据公式(6)、公式(7)和公式(8)对计算出的数据进行相对化和标准化处理,再根据公式(5)计算得到南昌市能源消费碳排放综合生态效率历年变化情况,并绘制出南昌市综合生态效率的变化走势图(图 1)。

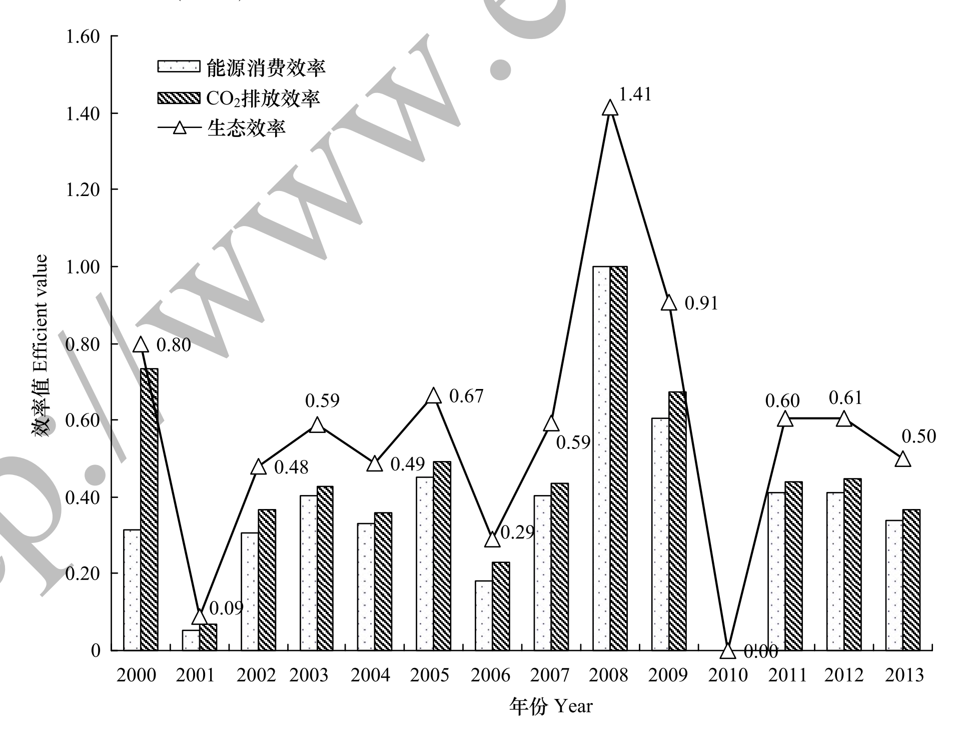


图 1　南昌市 2000—2013 年能源消费碳排放综合生态效率变化图

Fig.1　The change of Comprehensive Eco-efficiency of Energy Consumption in Nanchang from 2000 to 2013

从图 1 中可以看出,经过相对化和标准化处理后,能源消费效率和 CO_2 排放效率的值均位于[0, 1]中,两者最小值均为 2010 年的 0,最大值均为 2008 年的 1,其中 CO_2 排放效率值整体上大于能源消费效率;综合生

态效率的值均位于[0, $\sqrt{2}$]中,其中最小值是 2010 年的 0,最大值是 2008 年的 $\sqrt{2}$,符合度量模型的要求。

具体来看,在 2000—2013 年期间,南昌市能源消费碳排放综合生态效率经历了较大的波动变化,整体上值并不高,大多数年间值都低于 1。2001—2008 年,整体上呈上升趋势,并在 2008 年达到最大值 1.414,究其原因,近年来人们的节能减排意识逐渐明晰化,加之《南昌低碳城市发展规划》的出台,一系列低碳节能减排工作的实施,使得综合生态效率得到很大的优化提升。2009—2013 年呈现出先下降后缓慢上升的状态,主要是虽然人们的节能减排意识越来越强烈,政府也出台了一些政策来改善,但从前面的能源消费表格中也证实,南昌市能源消费结构长期以来以煤炭为主,天然气和电力等能源近年来才开始使用,占总使用比重非常小。南昌从老工业城市向二三产业的快速转型,经济的高速发展带动能源消耗高速增长,虽然近年来在努力的调整能源消费结构,煤炭的消耗相对于往年都在减少,但煤炭本身的消费基数大,煤炭的消耗总量依旧在增长,因而南昌市的节能减排还需要加大力度,能源消费碳排放综合生态效率需要继续优化提高。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文在能源代谢分析理念基础上,建立基于相对变量的城市能源消费碳排放综合生态效率度量模型,对南昌市 2000—2013 年能源消费碳排放及其综合生态效率进行测算与分析,主要得出以下几点结论:

(1) 南昌市在 2000—2013 年,能源消费总量和碳排放总量整体上呈上升趋势,从图中可以看出是一个“*N*”型曲线的走向,主要经历了快速增长、短暂下降、恢复平稳增长 3 个阶段,具体看,天然气、电力等低碳能源使用所占比例还很低,煤炭是南昌市能源消费和碳排放的主要来源,短时期内难以改变,南昌市能源消费结构的调整需要加大力度;

(2) 南昌市能源消耗与碳排放整体上呈现同步增长的趋势,同比碳排放量大于能源消费量,能源消费效率和碳排放效率有很大的提升空间;

(3) 南昌市整体综合生态效率值不高,还需大力优化能源消费结构,提高区域能源消费碳排放综合生态效率的关键是能源消费效率和碳排放效率的协同发展,逐步走向低碳经济发展的轨道。

3.2 讨论

(1) 本文在研究拟借鉴前人相关研究成果的基础上,提出了基于相对变量的集能源消耗效率和碳排放效率合成的能源消费碳排放综合生态效率,构建计算公式,并以南昌市近 14 年的数据为例对公式进行了检验,克服了以往表达公式中不具有统计的特性。研究表明,南昌市能源消费与碳排放呈现同比增长模式,综合生态效率的优化取决于能源效率和碳排放效率的改善,所以要遵循低碳经济发展方向,当务之急是先提高能源消费效率和碳排放效率,提高废物再生资源化水平,从而提高综合生态效率。

(2) 本文在计算各效率中,以 GDP 的值代替能源消费领域的增加值,使得经济效率的概念就模糊不清,难以创新性地表现出综合生态效率,目前的研究还存在一定的欠缺,今后还需继续完善,为南昌市的低碳经济发展提供更精确的指导实践。

参考文献(References):

[1] 王锋, 吴丽华, 杨超. 中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究. 经济研究, 2010, (2): 123-136.

[2] 郝丽, 孙娴, 张文静, 陈建文. 陕西省能源消费碳排放及脱钩分析. 水土保持研究, 2014, 21(5): 298-305.

[3] 张乐勤, 李荣富, 陈素平, 祝亚雯, 许信旺. 安徽省 1995 年-2009 年能源消费碳排放驱动因子分析及趋势预测——基于 STIRPAT 模型. 资源科学, 2012, 34(2): 316-327.

[4] 荀少梅, 王长建, 张利, 乔梦梦, 王璀蓉, 王强. 1990 — 2010 年广东省能源消费的碳排放驱动因素分析. 热带地理, 2012, 32(4): 389-394, 401-401.

[5] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. Science, 2008, 319(5864): 756-760.

[6] 石磊, 楼俞. 城市物质流分析框架及测算方法. 环境科学研究, 2008, 21(4): 196-200.
[7] 吴小庆, 王远, 刘宁, 陆根法. 基于物质流分析的江苏省区域生态效率评价. 长江流域资源与环境, 2009, 18(10): 890-895.
[8] Niza S, Rosado L, Ferrão P. Urban metabolism methodological advances in urban material flow accounting based on the Lisbon case study. Journal of Industrial Ecology, 2009, 13(3): 384-405.
[9] Browne D, O'Regan B, Moles R. Material flow accounting in an Irish City-Region 1992-2002. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(9/10): 967-976.
[10] Kuznecova T, Romagnoli Fo, Rochas C. Energy metabolism for resilient urban environment: a methodological approach. Procedia Economics and Finance, 2014, 18: 780-788.
[11] 王越, 王园, 毕军, 袁增伟. 工业园能源代谢分析. 环境科学研究, 2009, 22(8): 990-994.
[12] 刘晔, 耿涌. 基于多尺度综合评估方法的中国社会代谢分析. 经济地理, 2010, 30(4): 547-552.
[13] 张丽君, 秦耀辰, 张金萍, 鲁丰先. 城市碳基能源代谢分析框架及核算体系. 地理学报, 2013, 68(8): 1048-1058.
[14] 戴刚, 严力蛟, 郭慧文, 章戈. 基于 MSIASM 和能源消费碳排放的中国四大直辖市社会代谢分析. 生态学报, 2015, 35(7): 2184-2194.
[15] 吕彬, 杨建新. 生态效率方法研究进展与应用. 生态学报, 2006, 26(11): 3898-3906.
[16] 王家庭. 基于低碳经济视角的我国城市发展模式研究. 江西社会科学, 2010, (3): 85-89.
[17] 史安娜, 李淼. 基于 LMDI 的南京市工业经济能源消费碳排放实证分析. 资源科学, 2011, 33(10): 1890-1896.
[18] 张妍, 杨志峰. 城市物质代谢的生态效率——以深圳市为例. 生态学报, 2007, 27(8): 3124-3131.
[19] 黄和平. 基于生态效率的江西省循环经济发展模式. 生态学报, 2015, 35(9): 2894-2901.